

黄河口海域浮游植物群落结构演变趋势及影响因素

王占金¹ 李玲玲¹ 张文静² 王丙晖^{1#} 李鹏飞¹ 张启超¹ 杨雪娜¹ 纪金龙¹

(1.山东省生态环境规划研究院,生态环境部陆海统筹生态治理与系统调控重点实验室,山东 济南 250100;
 2.中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003)

摘要 受气候变化和人类活动的影响,黄河口海域的生态环境不断发生变化,对浮游植物的群落结构有直接影响。于 2019—2023 年间每年夏季(8 月)在黄河口海域采集水环境数据和浮游植物样品,分析浮游植物群落结构的演替规律及其影响因素。结果表明,黄河口浮游植物优势种主要为广温性近岸种、温带近岸种和广布种。受水温和营养盐结构影响,浮游植物的演替率较高,未发现 2019—2023 年持续存在的优势种。2019、2021 年出现甲藻优势种,表明浮游植物群落结构从硅藻为主的单一优势状态向硅藻-甲藻联合优势状态转变,这与黄河口海域高氮磷比和磷限制的营养结构密切相关。另外,黄河口海域出现了暖温性近岸种大洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)为优势种的情况,这可能与海水水温和无机氮较高有关。在气候变化的持续影响下,近岸海域出现暖温性种类优势地位的情况可能会逐渐增加。

关键词 黄河口海域 浮游植物 优势种 演替 影响因素

 DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.202410025

The succession trends and influencing factors of phytoplankton community structure in the Yellow River estuary WANG Zhanjin¹, LI Lingling¹, ZHANG Wenjing², WANG Binghui¹, LI Pengfei¹, ZHANG Qichao¹, YANG Xuena¹, JI Jinlong¹. (1. Shandong Academy for Environmental Planning, Key Laboratory of Land and Sea Ecological Governance and Systematic Regulation, Ministry of Ecology and Environment, Jinan Shandong 250100; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003)

Abstract: Under the influence of climate change and human activities, the ecological environment of the Yellow River estuary has been undergoing continuous changes, directly impacting the community structure of phytoplankton. This study collected hydrological data and phytoplankton samples from the Yellow River estuary during the summer (August) of each year from 2019 to 2023 to analyze the succession patterns of phytoplankton community structure and their influencing factors. The results showed that the dominant phytoplankton species in the Yellow River estuary were primarily eurythermal coastal species, temperate coastal species and widespread species. Influenced by water temperature and nutrient structure, the phytoplankton succession rate was relatively high, and no dominant species were found to persist throughout the study period from 2019 to 2023. In 2019 and 2021, dinoflagellates emerged as dominant species, indicating a shift in the phytoplankton community structure from a diatom-dominated state to a co-dominance of diatoms and dinoflagellates. This shift was closely related to the high nitrogen-to-phosphorus ratio and phosphorus-limited nutrient structure in the Yellow River estuary. Additionally, the appearance of the warm-temperate coastal species *Cerataulina pelagica* as a dominant species in the Yellow River estuary might be associated with higher seawater temperatures and elevated levels of inorganic nitrogen. Under the ongoing influence of climate change, the dominance of warm-temperate species in coastal waters was likely to increase.

Keywords: Yellow River estuary; phytoplankton; dominant species; succession; influencing factors

浮游植物作为海洋中重要的初级生产者,是海洋食物网的基础,参与着海洋生态系统的物质循环和能量流动,对海洋渔业资源有重要影响。浮游植物对海洋生态环境的变化高度敏感,能够对各种环境因子作出响应,迅速调整其物种组成、结构、生物量及分布格局,从而引发食物网结构和海洋生态系统的变化^[1-3]。有研究表明,通过分析浮游植物群落结构的变化及其影响因素,可以揭示和预测生态系统的长期演变趋势^{[4],[5]206-216}。

 黄河是我国北方第一大河流,每年向邻近海域输入大量的泥沙、淡水和营养盐,为浮游植物生长提供了丰富的营养^[6]。黄河口位于渤海湾和莱州湾的

第一作者:王占金,男,1982 年生,硕士,高级工程师,研究方向为海洋生态环境保护。# 通信作者。

交汇处,是连接陆海的重要过渡带,拥有复杂的水动力过程和独特的生境特征,为黄渤海渔业生物提供了重要的索饵、产卵和育幼场所。黄河口海域浮游植物的物种组成、生物量分布及群落动态受到气象、水文、径流量、污染排放、调水调沙工程等多种自然和人为因素的共同影响^[7]。鉴于黄河口海域生态环境的不断变化,探究浮游植物群落结构和优势种的演替规律及其主要影响因素,仍是一项必要的研究任务。

为此,本研究对近年来黄河口浮游植物群落结构演变趋势开展研究。鉴于夏季浮游植物丰度最高,能更准确地反映黄河口浮游植物分布情况,于2019—2023年的每年8月对黄河口海域进行水文、化学和生物等生态环境因素的综合调查。通过分析该海域浮游植物的种类、丰度、优势种及群落结构指数,阐明了黄河口海域浮游植物群落结构和优势种的长期演变趋势及其影响因素,为深入探讨黄河口海域浮游生态系统的发展趋势和演变机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位与样品采集

在黄河口海域设置20个站位(记为S1~S20),站位位置见图1。于2019—2023年夏季开展采样调查。每年采样站位的选择根据天气情况、人员情况等有所调整,具体见表1。根据《海洋调查规范 第6部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)中浮游生物样品采集的方法,利用浅水Ⅲ型浮游生物网

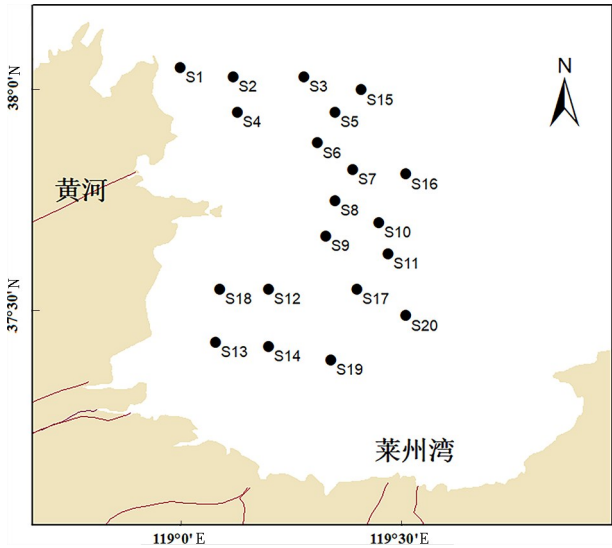


图1 黄河口海域调查站位分布
Fig.1 Distribution of survey stations in the Yellow River estuary area

表1 黄河口海域采样站位信息
Table 1 Sampling station information of the Yellow River estuary area

站位	水深/m	采样时间
S1	7.5	2019—2023 年
S2	12.2	2023 年
S3	15.4	2019—2020 年,2023 年
S4	9.4	2019—2023 年
S5	15.7	2019—2020 年,2023 年
S6	5.4	2019—2023 年
S7	13.2	2019—2023 年
S8	7.9	2023 年
S9	6.3	2019—2023 年
S10	12.6	2023 年
S11	13.4	2019—2023 年
S12	4.8	2019—2023 年
S13	5.6	2019—2023 年
S14	8.4	2019—2023 年
S15	17.0	2019—2023 年
S16	16.6	2019 年,2021—2023 年
S17	13.1	2019—2020 年,2023 年
S18	2.4	2021—2023 年
S19	10.6	2019—2023 年
S20	12.9	2019—2023 年

(网口直径37 cm,网口面积0.1 m²,网孔径76 μm)在每个站位从底层至表层拖网1次采集浮游植物样品,收集在500 mL样品瓶中,并立即用5%(体积分数)甲醛固定,置于遮光阴凉处保存。浮游植物样品带回实验室后用显微镜进行种类鉴定和计数。在各站位同步采集50 mL表层海水,现场测定水温、pH、盐度等参数,使用QuAAtro营养盐自动分析仪(德国SEAL公司)测定海水磷酸盐(DIP)、无机氮(DIN)等数据。

1.2 数据处理与分析

采用优势度(Y_i)、Shannon-Wiener 指数(H')、Pielou 均匀度指数(J)和浮游植物优势种更替率($R, \%$)评价浮游植物群落结构及其演替状况,各指数计算见式(1)至式(4)。

$$Y_i = \frac{n_i}{N} \times f_i \tag{1}$$

$$H' = - \sum_i \frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \tag{2}$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \tag{3}$$

$$R = \frac{a+b-2c}{a+b-c} \times 100\% \tag{4}$$

式中: Y_i 为第*i*种浮游植物的优势度; n_i 为第*i*种浮游植物的丰度,个/m³; N 为浮游植物总丰度,个/m³; f_i 为第*i*种浮游植物在各站位出现的频率; S 为各站位浮游植物种类数; a 、 b 分别为相邻年度

浮游植物优势种的种类数; c 为相邻年度相同优势种的种类数。

一般把 $Y_i \geq 0.02$ 的浮游植物种类定义为优势种。 H' 取值一般大于 0, H' 越大, 表示生态系统中生物多样性越高。 J 的取值在 0~1, J 越大, 表示群落中不同物种的分布越均匀。采用 Pearson 相关性分析评估浮游植物丰度与环境因子的关系, 浮游植物丰度与环境因子均经对数转换, 并用 R 语言计算其相关系数和 p 值。

2 结果与分析

2.1 水文环境因子的分布与历年变化趋势

2019—2023 年夏季黄河口海域表层盐度、水温、pH 和营养盐浓度的分布情况见图 2。2019 年盐度在 22.54‰~31.74‰, 低值区出现在调查区域南部的站位; 2020、2023 年盐度分别在 14.97‰~29.68‰、19.16‰~29.92‰, 最低值出现在黄河入海口附近的 S5、S6 站位; 2021、2022 年盐度为 24.35‰~31.64‰、19.45‰~30.85‰, 呈现从南向北、从近岸到远岸逐渐升高的变化趋势。受冲淡水的影响, 在黄河入海口区域均出现盐度低值区。整体上看, 2019—2023 年夏季黄河口海域盐度的平均值呈振荡降低的趋势, 2019 年平均值为 28.35‰, 2023 年平均值为 27.43‰(见图 3(a))。

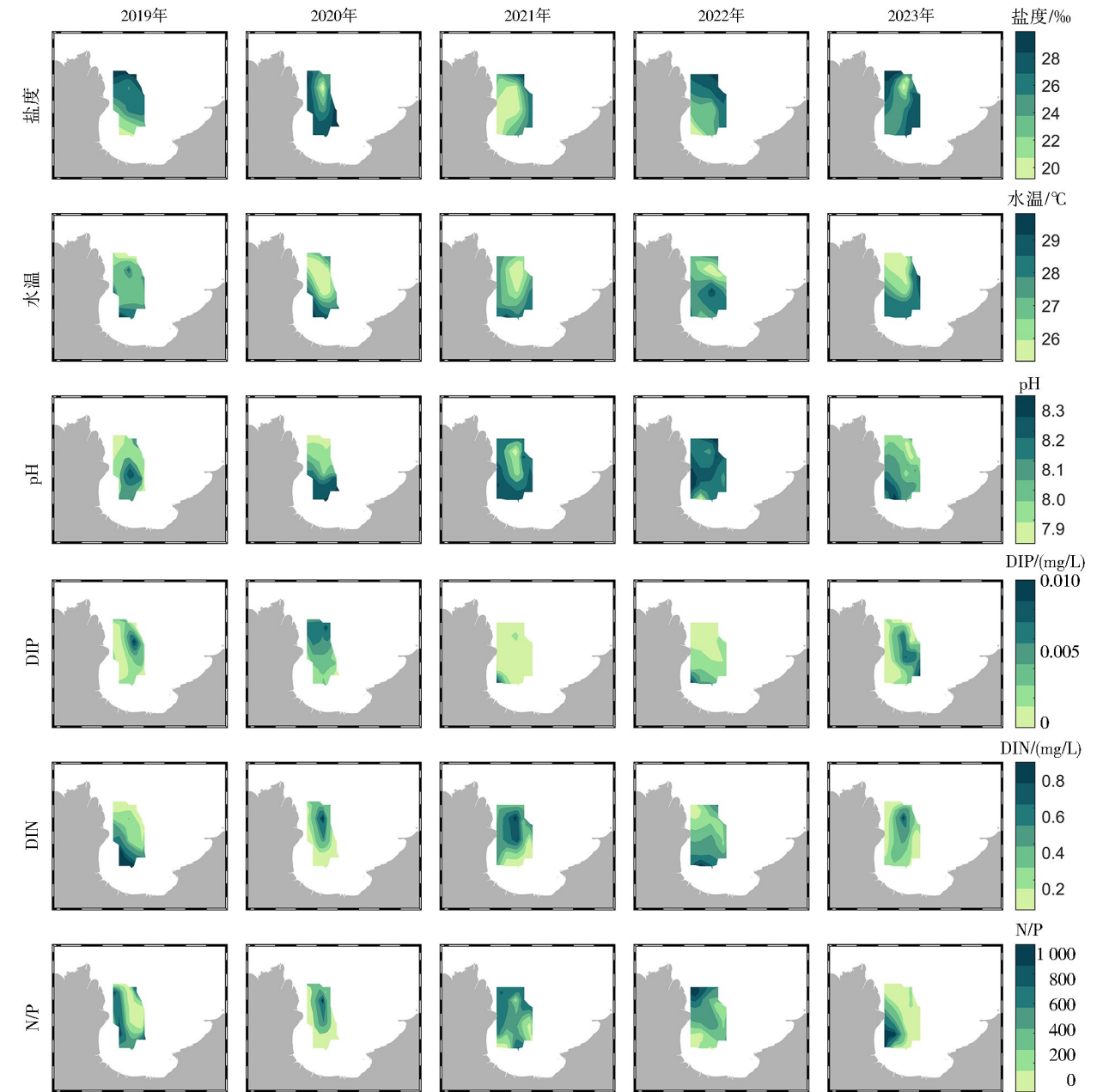


图 2 黄河口海域的环境因子及营养盐分布
 Fig.2 Distribution of environmental factors and nutrient in the Yellow River estuary area

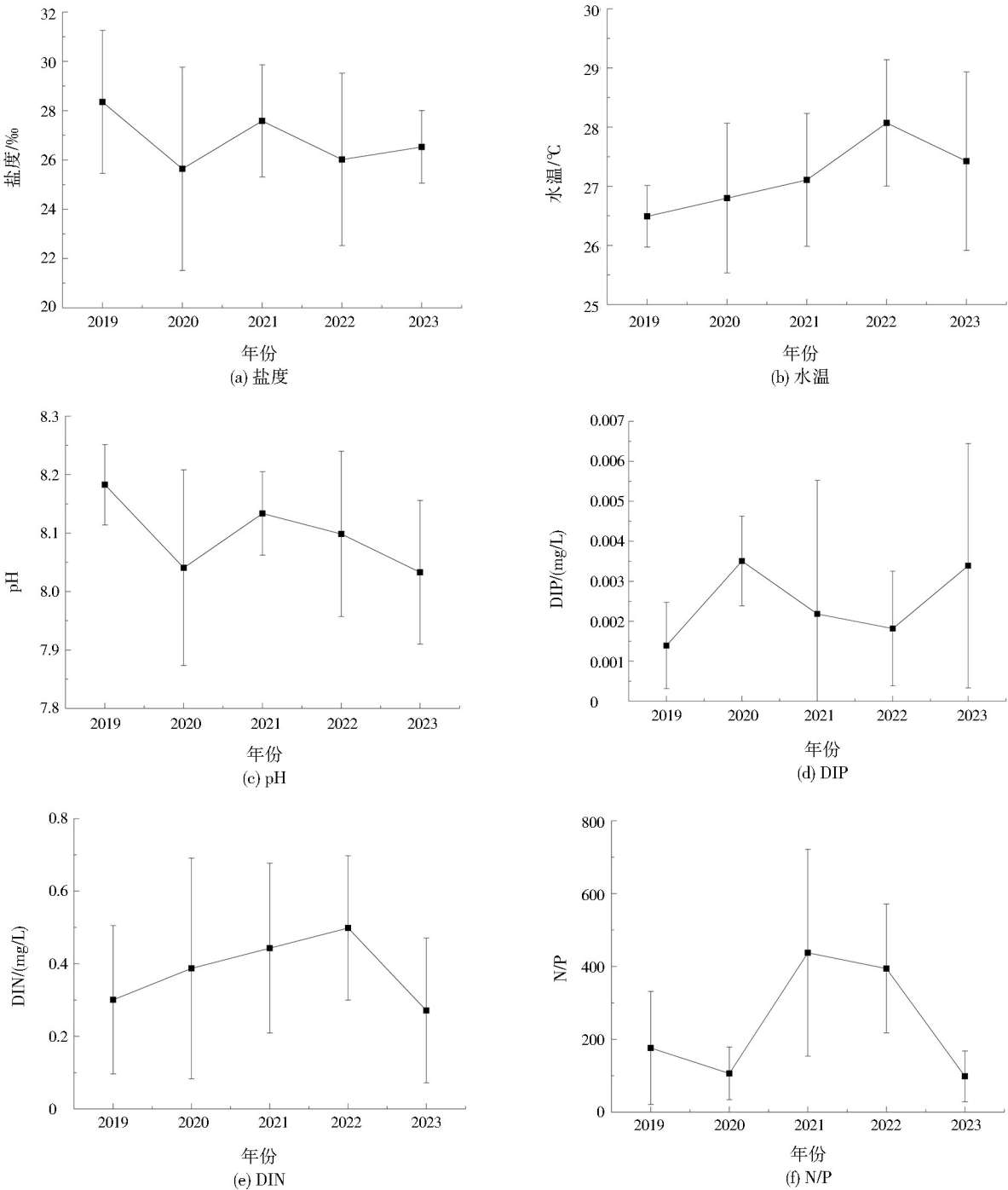


图3 黄河口海域表层盐度、水温、pH、DIP、DIN 和 N/P 的年度变化

Fig.3 Annual variation trends of salinity, water temperature, pH, DIP, DIN and N/P in the Yellow River estuary area

黄河口海域 2019 年表层水温在 25.60~27.70℃,最低值出现在调查区域的 S3 站位;2020、2021、2022 年表层水温分别在 25.00~28.60、24.90~29.30、26.10~30.20℃,2020—2022 年表层水温的低值区均位于黄河入海口附近的 S6、S7、S9 站位;2023 年表层水温为 25.30~29.80℃,低值区分布在黄河入海口北部的 S3、S4、S5、S6 站位。2019—2023 年表层水温高值区主要集中在黄河口南部靠

近莱州湾内 S14 站位附近。整体上,黄河口海域表层水温呈上升趋势,2019 年平均值为 26.49℃,到 2023 年平均值达到 27.43℃(见图 3(b))。

黄河口海域 2019 年 pH 在 8.08~8.35,平均值为 8.18,最高值出现在黄河入海口附近的 S9 站位;2020 年 pH 在 7.83~8.27,平均值为 8.04,整体分布呈现明显的北低南高的趋势;2021 年 pH 为 7.95~8.21,平均值为 8.13,低值区主要分布在黄河入海口

附近的 S6、S9 站位,南部的 pH 整体高于北部;2022 年 pH 为 7.70~8.27,最低值出现在调查区域南部的 S14 站位,最高值位于南部近岸的 S18 站位;2023 年 pH 为 7.82~8.32,最高值分布在调查区域南部的 S14 站位。整体上,pH 最高值均出现在黄河口以南的站位。从年度变化来看,pH 呈现逐年下降的趋势,这可能是全球气候变化和海洋酸化的直接表现(见图 3(c))。

2019—2023 年黄河口海域 DIP 整体水平都很低(平均质量浓度为 0.002 5 mg/L),处于磷限制状态,尤其是 2021—2022 年。这是由于黄河入海水的含沙量高^{[8]140},泥沙对磷酸盐的吸附能力较强,使得大量的磷酸盐被沉降且吸附在泥沙颗粒中^[9-10],因此,自 20 世纪 90 年代以来,黄河口海域一直处于“氮多磷少”的磷限制状态^[11-13]。

调查期间,黄河口海域 DIN 平均质量浓度为 0.38 mg/L,2019 年 DIN 为 0.08~0.68 mg/L,2022 年的 DIN 为 0.19~0.89 mg/L,高值区集中在调查海区南部;2020、2021、2023 年 DIN 分别为 0.06~1.15、0.14~0.86、0.03~0.85 mg/L,高值区集中在黄河入海口附近 S6 站位。从年度变化来看,2019—2022 年黄河口海域 DIN 浓度逐渐升高,2022 年开始呈现下降的趋势(见图 3(e))。

2023 年除 3 个站位的 N/P 小于 16 外,其他站位 N/P 在 24.78~848.49。N/P 的年度变化趋势呈现先升高后降低的趋势(见图 3(f)),2021 年 N/P 平均值最高(437.70),2023 年 N/P 平均值最低(98.33),由于 2019—2023 年黄河入海口附近的 DIP 浓度低于检测限,导致该部分 N/P 数据缺失。结合历史文献,由于夏季汛期黄河口入海径流量增加,导致黄河口及莱州湾西部海域 DIN 污染明显高于其他海域^[14],同时由于该区域的 DIP 浓度较低,因此其 N/P 明显高于其他区域。

2.2 浮游植物的群落结构变化

2.2.1 浮游植物物种组成与丰度变化

2019—2023 年夏季,黄河口海域共鉴定出浮游植物 4 门 43 属 80 种,其中包括硅藻 38 属 70 种,甲藻 3 属 9 种,着色鞭毛 1 属 1 种,裸藻 1 属。调查期间,黄河口海域浮游植物种数呈逐渐增加趋势。2019 年鉴定出浮游植物 18 属 32 种,包括硅藻 15 属 24 种,甲藻 3 属 8 种。2020 年鉴定出浮游植物 23 属 41 种,包括硅藻 21 属 37 种,甲藻 2 属 4 种。2021 年鉴定出浮游植物 22 属 39 种,包括硅藻 19 属 34 种,甲藻 2 属 5 种,裸藻 1 属。2022、2023 年

浮游植物类群均为硅藻、甲藻和着色鞭毛藻,其中 2023 年鉴定的硅藻种类最多,达到 23 属 42 种。可见,硅藻是黄河口海域的优势类群,这与以往的研究结果一致^{[15]4,[16]138}。

2019—2023 年夏季黄河口海域浮游植物丰度呈现逐年增加的趋势,2019 年浮游植物平均丰度为 2.11×10^6 个/ m^3 ,2023 年平均丰度达到 1.12×10^7 个/ m^3 ,调查期间平均丰度为 5.10×10^6 个/ m^3 ,硅藻占浮游植物总丰度的 99.05%,主导着浮游植物总丰度的变化,甲藻丰度的变化趋势与硅藻相反,呈现逐渐减少的趋势。

2.2.2 浮游植物丰度与环境因子的相关性

调查区域浮游植物丰度与环境因子的相关性分析见表 2。2021 年黄河口海域的 N/P 最高,甲藻的丰度占比也达到 2019—2023 年最高值 8.01%,这是因为甲藻更喜欢高 N/P、磷限制的环境^{[5]213-214},相关性分析也显示 2021 年甲藻丰度与 N/P 呈显著正相关。2023 年浮游植物、硅藻的丰度与 DIN 和 N/P 均呈显著正相关,表明 2023 年营养盐结构有利于硅藻生长。当海水中 DIP 小于 0.003 1 mg/L 时,浮游植物的生长会受到绝对磷限制^[17]。2023 年 DIP 的平均质量浓度为 0.003 4 mg/L,且 N/P 最低,硅藻不再受到绝对磷限制,因此 2023 年度硅藻丰度达到最高。相关性分析显示,2019、2023 年硅藻与 DIN 呈显著正相关,2022 年甲藻与 DIN 呈显著负相关,表明硅藻更喜欢营养盐丰富的环境,而甲藻对营养盐浓度不太敏感^{[5]213-214}。另外,2022 年盐度与浮游植物总丰度、硅藻丰度呈显著负相关,与甲藻丰度呈显著正相关,同时甲藻丰度与 DIP、DIN 浓度呈显著负相关,这可能与 2022 年 8 月较高的冲淡水量带入大量营养盐有关。

2.2.3 浮游植物优势种的演替及与环境因子的关系

2019—2023 年黄河口海域浮游植物优势种以广温性近岸种为主(见表 3)。2019 年黄河口海域的浮游植物优势种主要为广温性近岸种类,包括旋链角毛藻(出现频率 46.67%)、尖刺伪菱形藻(出现频率 66.67%)、中肋骨条藻(出现频率 33.33%),还包括北温带至亚热带种类威利圆筛藻(出现频率 93.33%)以及广布种夜光藻(出现频率 93.33%)。夜光藻存在于各温带至亚热带的近岸海域,适宜生长温度为 10~30 ℃^[18],近岸海域频繁发生夜光藻赤潮^[19]。夜光藻在夏季成为黄河口海域优势种的情况首次出现^{[8]144,[20]}。Pearson 相关性分析显示,夜光藻与水温、pH 和营养盐等环境因子之间均无

表 2 调查区域浮游植物丰度与环境因子的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors in the study area

年份	丰度	盐度	水温	pH	DIP	DIN	N/P
2019	浮游植物	−0.40	0.12	0.22	0.02	0.52 *	0.12
	硅藻	−0.42	0.13	0.16	0.07	0.54 *	0.09
	甲藻	−0.09	0.01	0.50	−0.09	0.02	−0.10
2020	浮游植物	0.02	−0.20	0.01	0.05	0.06	0.13
	硅藻	0.02	−0.19	0.02	0.06	0.06	0.12
	甲藻	−0.03	−0.51	−0.50	0.21	0.27	0.30
2021	浮游植物	−0.08	−0.18	−0.31	0.06	0.39	0.12
	硅藻	−0.17	−0.12	−0.31	0.10	0.37	0.06
	甲藻	0.27	−0.58 *	−0.40	−0.47	0.43	0.70 *
2022	浮游植物	−0.55 *	0.23	0.31	0.39	0.40	−0.36
	硅藻	−0.57 *	0.27	0.30	0.42	0.46	−0.43
	甲藻	0.87 * *	−0.53	0.10	−0.66 *	−0.72 *	0.49
2023	浮游植物	−0.38	−0.13	0.35	−0.37	0.49 *	0.65 * *
	硅藻	−0.38	−0.13	0.35	−0.37	0.49 *	0.65 * *
	甲藻	0.25	−0.48	−0.04	−0.12	−0.19	−0.11

注: ¹⁾ *、* * 分别表示在 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 水平上显著相关。

显著相关性,表明这些环境因子不是夜光藻生长的限制因素。夜光藻是兼性营养,黄河口海域环境条件下高丰度的链状硅藻可能是造成夜光藻优势地位的主要因素^[21]。此外,旋链角毛藻($p<0.05$)和中肋骨条藻($p<0.01$)的丰度均与 DIN 显著正相关,表明链状硅藻更喜欢营养丰富的环境。威利圆筛藻与水温 和 DIN 呈显著负相关($p<0.01$); ONO 等^[22]发现在温度较低的 11 月,日本濑户内海的 Harima-Nada 出现了两次威利圆筛藻峰值,且均伴随着营养盐的耗尽,表明威利圆筛藻可能更喜欢温度较低且营养盐不太丰富的环境。

2021 年黄河口海域的浮游植物优势种最多,以近岸种为主,包括温带近岸种劳氏角毛藻、圆柱角毛藻和菱形海线藻(出现频率分别为 71.43%、57.14%、92.86%),广温性沿岸种透明辐杆藻、旋链角毛藻(出现频率分别为 57.14%、71.43%),世界广布种虹彩圆筛藻和三角角藻(出现频率分别为 100.00%、57.14%),以及温热带暖水性近岸种类窄面角毛藻(出现频率分别为 78.57%)。三角角藻属于广温广盐性世界广布种,通常每年 8 月在渤海形成优势种。分析历史数据,除 20 世纪 90 年代报道了三角角藻为黄河口海域的优势种外^{[23]916},21 世纪以来对黄河口浮游植物群落结构的调查鲜有出现三角角藻处于优势地位的情况^{[8]144}。越来越多的研究表明,甲藻尤其是角藻属的种类在夏季形成优势种,是因为甲藻对温度和营养盐浓度不太敏感,但是更喜欢低磷和高 N/P 的环境^{[5]213-214}。本研究中三角

角藻与各环境因子之间均无相关性($p>0.05$),但 2021 年海域平均 N/P 在 2019—2023 年中最高,因此三角角藻的优势地位可能是高 N/P 的结果。

2022 年 8 月的浮游植物优势种均为近岸种,包括温带近岸种布氏双尾藻、尖刺伪菱形藻以及暖温性近岸种大洋角管藻(出现频率均为 57.14%)。大洋角管藻是河口和近岸海域的关键藻华种,在 0~25℃均可形成藻华^[24];本研究中,2022 年 8 月黄河口海域盐度在 19.45‰~30.85‰,大洋角管藻的丰度与盐度呈极显著负相关($p<0.01$),表明大洋角管藻更喜欢盐度较低的河口环境。已发表的文献中,大洋角管藻作为黄河口优势种的情况较为罕见^{[8]144,[23]916}。2022 年 8 月的平均水温在 5 年内最高,达到 28.07℃;相关性分析显示大洋角管藻的丰度与 DIP 和 DIN 均呈显著正相关($p<0.05$),因此水温、DIN 较高时可能有利于大洋角管藻生长。

2020 年 8 月,黄河口海域的浮游植物优势种主要为广温性近岸种旋链角毛藻、尖刺伪菱形藻(出现频率分别为 85.71%、92.86%),广布种中肋骨条藻、伏氏海线藻(出现频率分别为 85.71%、100.00%)和温带近岸浮游种布氏双尾藻(出现频率分别为 100.00%)。2023 年 8 月的优势种为旋链角毛藻、尖刺伪菱形藻和中肋骨条藻(出现频率分别为 65.00%、65.00%、60.00%)。这些种类均与历史报道中的优势种一致。角毛藻、骨条藻、海线藻、尖刺伪菱形藻等都是河口和近岸海域常见的优势种和藻华种^[25],因为硅藻喜欢营养丰富的环境^[26],河口海

表 3
 2019—2023 年 8 月黄河口海域浮游植物优势种

Table 3
 The dominant phytoplankton in the nearby seawater of Yellow River estuary area in the August from 2019 to 2023

优势种	2019 年		2020 年		2021 年		2022 年		2023 年	
	优势度	平均丰度/ (10 ⁵ 个/m ³)	优势度	平均丰度/ (10 ⁵ 个/m ³)	优势度	平均丰度/ (10 ⁵ 个/m ³)	优势度	平均丰度/ (10 ⁵ 个/m ³)	优势度	平均丰度/ (10 ⁵ 个/m ³)
透明辐杆藻 (<i>Bacteriastrium hyalinum</i>)					0.029	0.25				
大洋角管藻 (<i>Cerataulina pelagica</i>)							0.023	3.32		
角毛藻 (<i>Chaetoceros</i> sp.)			0.022	1.03	0.055	0.31	0.022	1.93		
旋链角毛藻 (<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	0.082	7.96	0.150	7.48	0.171	1.43			0.146	25.12
劳氏角毛藻 (<i>Chaetoceros lorenzianus</i>)					0.059	0.49				
窄面角毛藻 (<i>Chaetoceros paradoxus</i>)					0.046	0.33				
圆柱角毛藻 (<i>Chaetoceros teres</i>)					0.051	0.35				
圆筛藻属 (<i>Coscinodiscus</i> sp.)	0.115	2.90								
虹彩圆筛藻 (<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>)					0.028	0.16				
威利圆筛藻 (<i>Coscinodiscus wailesii</i>)	0.030	1.06								
布氏双尾藻 (<i>Ditylum brightwellii</i>)			0.067	2.89			0.229	32.97		
尖刺伪菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	0.056	2.67	0.095	4.37			0.234	33.76	0.192	35.86
中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	0.116	22.07	0.352	17.45					0.189	32.59
伏氏海线藻 (<i>Thalassionema frauenfeldii</i>)			0.062	2.64						
菱形海线藻 (<i>Thalassionema nitzschioides</i>)					0.057	0.37				
夜光藻 (<i>Noctiluca scintillans</i>)	0.033	0.80								
三角角藻 (<i>Ceratium tripos</i>)					0.039	0.39				

岸带区域的高 DIN 富营养环境为其生长提供了良好的环境条件。

2019—2023 年调查期间,黄河口海域浮游植物优势种的演替率较高,除 2019—2020 年的演替率为 66.67% 外,其他年份间的演替率均超过 80%。2021、2022、2023 年浮游植物优势种的演替率分别为 84.62%、91.67%、83.33%,未发现 2019—2023 年有持续存在的优势种。2000 年以来黄河口海域的浮游植物优势种主要为硅藻,仅 2013 年出现了梭状角藻优势种^{[8]144, [15]4, [16]138, [27]};本研究在 2019—2023 年的调查中,有 2 年出现甲藻优势种,表明黄河口近海生态系统的浮游植物群落结构在从硅藻的优势地位向硅藻-甲藻联合优势地位转变。有研究表明,渤海海域的浮游植物群落结构也呈现从硅藻

优势向硅藻-甲藻联合优势转变的趋势,且在高 N/P 和磷限制条件下,甲藻具有明显的竞争优势^[28-29]。相关性分析结果显示,2023 年 N/P 较低,硅藻与 N/P 呈显著正相关;2021 年 N/P 最高,甲藻与 N/P 呈显著正相关,进一步表明黄河口海域的营养结构与甲藻优势地位的出现有密切关系。另外,2022 年 8 月黄河口处暖温性近岸种大洋角管藻呈现优势地位,也表明在全球气候变化的背景下,北方近海海域可能会频繁地出现暖温带种类的优势种。

2.2.4 浮游植物群落结构指数的分布

整体上,2019—2023 年黄河口海域 *H'* 平均值的变化幅度较小,为 1.72~2.03,但是年度间各站位的差异较大。2019、2020、2022、2023 年各站位 *H'* 的变化范围分别在 0.68~2.27、1.12~2.25、1.28~

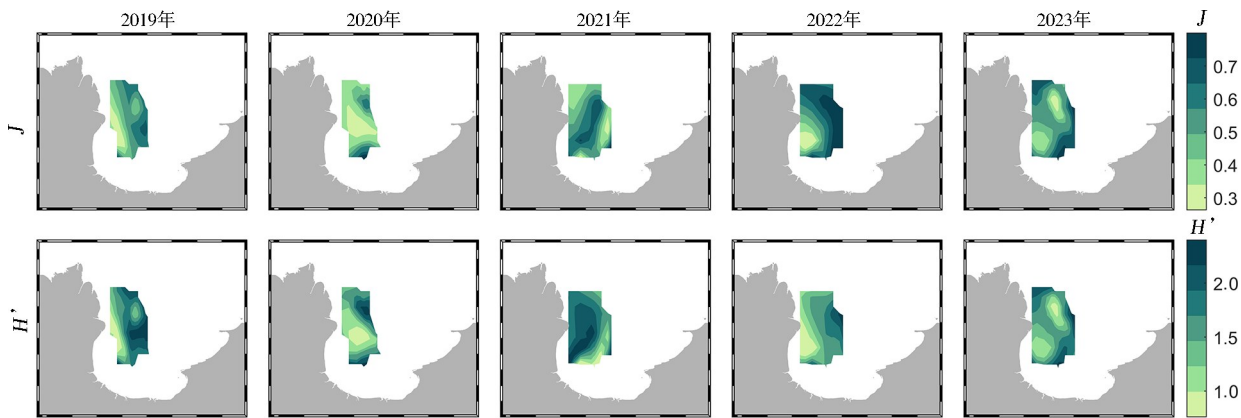


图4 黄河口海域浮游植物群落结构的 J 和 H' 的分布

Fig.4 J , H' distribution of phytoplankton community in the Yellow River estuary area

2.74、0.76~2.50,低值区均出现在黄河入海口附近或其南部的近岸站位,高值区出现在距离黄河入海口较远的远岸站位或调查区域的南部站位(见图4)。2021年黄河口海域 H' 为 1.40~2.30,其高值区和低值区的分布与其他年份不同。

2019—2023年黄河口海域 J 平均值在 0.59~0.75,整体上波动较小。2019、2020、2021、2022、2023年 J 的变化范围分别为 0.27~0.90、0.41~0.94、0.55~0.91、0.47~0.87、0.26~0.83,各调查航次期间, J 的高值区和低值区分布基本与 H' 一致。

一般来说,当 H' 在 0~1 时表示严重污染,在 1~3 时表示中度污染; J 在 0~0.3 时表示重污染,在 0.3~0.5 时表示中污染,在 0.5~0.8 表示轻污染或无污染^[30]。根据调查期间 H' 与 J 的分布情况,2019—2023年黄河入海口附近的海域处于重污染或中污染水平,在距离黄河入海口较远的远岸站位或调查区域的南部站位处于中污染或轻污染状态。张翔等^{[8]139-147}通过 DIN 污染指数评价法也发现 2015—2019年黄河口和莱州湾西部海域的污染程度高于其他区域。黄河口海域 2004—2010年夏季的 H' 介于 1.79~2.98,平均值为 2.47; J 的变化范围在 0.39~0.77,平均值为 0.57^[31],表明该海域处于轻度至中度污染状态;与之相比,2019—2023年夏季的浮游植物群落均匀度显著提高,多样性明显降低,表明黄河口海域仍然处于轻度与中度污染状态之间。

3 结 论

根据 2019—2023 年每年夏季黄河口海域的浮游植物和水环境数据,分析浮游植物群落结构的演替规律及其影响因素,相关结论如下:

1) 2019—2023 年黄河口海域 DIN 的平均质量

浓度为 0.38 mg/L,DIP 的平均质量浓度为 0.002 5 mg/L;除 2023 年 3 个站位的 N/P 小于 16 外,其他站位 N/P 为 24.78~848.49,与以往调查结果类似,该海域仍然处于“氮多、磷少”的磷限制状态。

2) 2019—2023 年黄河口海域浮游植物优势种以广温性近岸种为主,共发现浮游植物优势种 17 种,以硅藻为主。浮游植物优势种的年度演替率较高,演替率为 66.67%~91.67%,未发现持续存在的优势种。调查期间,有 2 年出现甲藻为优势种的情况,黄河口近海生态系统的浮游植物群落结构有从硅藻的优势地位向硅藻-甲藻联合优势地位转变的趋势,这与高 N/P 和磷限制的营养结构有关。黄河口海域出现以暖温性近岸种大洋角管藻为优势种的情况,这可能与表层水温和 DIN 较高有关。

3) 黄河口海域的表层水温整体呈上升趋势,pH 呈下降趋势,表明在海洋暖化、酸化以及调水调沙工程的共同作用下,黄河口生态环境正经历显著变化。作为对环境变化敏感的生物指示物,浮游植物群落的结构演变不仅反映了环境变化的影响,还对海洋生态系统的健康状况具有重要指示作用。因此,对黄河口浮游植物群落结构及其影响因素的长期监测和研究,对于揭示近海生态系统的演变规律及其驱动机制具有重要的科学意义。

参考文献:

[1] GROSSI F, LAGASIO M, NAPOLI A, et al. Phytoplankton spring bloom in the NW Mediterranean Sea under climate change[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 169884.
[2] JIANG T, WU G, NIU P, et al. Short-term changes in algal blooms and phytoplankton community after the passage of Super Typhoon Lekima in a temperate and inner sea (Bohai Sea) in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022,

232;113223.

[3]

OUAISSA S,GÓMEZ JAKOBSEN F,YEBRA L,et al.Phyto-plankton dynamics in the Mar Menor,a Mediterranean coastal lagoon strongly impacted by eutrophication[J].Marine Pollution Bulletin,2023,192:115074.

[4]

DEPPELER S L, DAVIDSON A T. Southern ocean phyto-plankton in a changing climate[J].Frontiers in Marine Science, 2017,4:40.

[5]

XIAO W P, LIU X, IRWIN A J, et al. Warming and eutrophica-tion combine to restructure diatoms and dinoflagellates[J]. Water Research, 2018, 128.

[6]

刘晓彤,刘光兴.2009 年夏季黄河口及其邻近水域网采浮游植物的群落结构[J].海洋学报,2012,34(1):153-162.

[7]

WALLING D E. Human impact on land-ocean sediment trans-fer by the world’s rivers[J].Geomorphology, 2006, 79(3/4): 192-216.

[8]

张翔,李榛.2015—2020 年黄河口近岸海域生态环境监测与分析[J].水土保持通报,2022,42(3).

[9]

顾家伟.黄河营养盐输送与河口近海生态健康研究进展[J].人民黄河,2018,40(2):81-87.

[10]

李北罡,马钦,刘培怡.黄河中下游沉积物对磷酸盐的吸附动力学研究[J].生态环境学报,2010,19(8):1901-1905.

[11]

ZOU L,ZHANG J,PAN W X,et al. In situ nutrient enrich-ment experiment in the Bohai and Yellow Sea[J].Journal of Plankton Research,2001,23(10):1111-1119.

[12]

王丽莎,魏西会,张海波,等.渤海中部冬夏季叶绿素 a 和营养盐结构影响因素对比分析[J].海洋渔业,2021,43(4):473-484.

[13]

吴傲琳,钟正浩,于松,等.近 20 年黄河口营养盐结构演变及现状研究[J].渔业科学进展,2024,45(2):1-13.

[14]

寿玮玮,宗海波,丁平兴.夏季黄河入海径流对黄河口及附近海域环流影响的数值研究[J].海洋学报,2016,38(7):1-13.

[15]

牛明香,王俊,刘志国,等.基于浮游植物生物完整性的黄河口近岸海域生态健康评价[J/OL].渔业科学进展,2024[2024-09-25]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract? v = QMamdX4-Fk-eXZf7nGbqu _ pAmpuKgG4bq _ YqxWC SPQknZ66bVpFvZYxBfQBEAO34NoXRrEO7RDmgN_USi2 UUiMLBY4QlChoTtEh_5-9LKb4sA1k8vLwsLFmPp8yuCOS i5sqh3sXESPuklXVf3aT3R03z03mOeOtuJ052WnZVLPoCcD TO9jRgwDYMxJpzGeY6&uniplatform = NZKPT&language = CHS.DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20231224001

[16]

秦华伟,陶慧敏,张娟,等.营养盐和重金属等环境因子对莱州湾浮游植物的影响[J].海洋湖泊通报,2023,45(5).

[17]

WANG Y B,SUN Y Y,WANG C X,et al. Net-phytoplankton community structure and its environmental correlations in central Bohai Sea and the Bohai Strait[J].Aquatic Ecosystem Health & Management,2019,22(4):481-493.

[18]

段晓萌,秦华伟,马浩阳,等.黄河口及莱州湾海域磷的时空分布及浮游生物对低磷胁迫的响应[J].中国海洋大学学报(自

然科学版),2023,53(11):87-98.

[19]

DO ROSÁRIO GOMES H,GOES J I,MATONDKAR S G P,et al. Massive outbreaks of *Noctiluca scintillans* blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia[J].Nature Commu-nications,2014,5:5862.

[20]

于宁,于建生,吕振波,等.山东海域赤潮灾害特征及预警报管理[J].生态学杂志,2012,31(5):1272-1281.

[21]

ZHANG Y X, SONG S Q, CHEN T T, et al. Population dy-namics and reproduction of the heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans* in Jiaozhou Bay, China[J].Marine Ecol-ogy Progress Series, 2022, 693: 55-68.

[22]

ONO A, TADA K, ICHIMI K. Chemical composition of *Coscinodiscus wailesii* and the implication for nutrient ratios in a coastal water, Seto Inland Sea, Japan[J].Marine Pollution Bulletin,2008,57(1/2/3/4/5):94-102.

[23]

栾青杉,康元德,王俊.黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化(1960—2010)[J].中国水产科学,2017,24(5).

[24]

HERNÁNDEZ BECERRIL D. Morphology of two species of the marine planktonic diatom genus *Cerataulina* H. Peragallo Ex Schutt (Bacillariophyta) from the tropical Mexican Pacif-ic, including a new record for the area[J].Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela,2020,59(1):9-14.

[25]

CARSTENSEN J, KLAIS R, CLOERN J E. Phytoplankton blooms in estuarine and coastal waters: seasonal patterns and key species[J].Estuarine Coastal and Shelf Science, 2015, 162: 98-109.

[26]

MARAÑÓN E,CERMEÑO P,LATASA M,et al. Tempera-ture,resources,and phytoplankton size structure in the ocean [J].Limnology and Oceanography,2012,57(5):1266-1278.

[27]

秦雪,徐宾铎,杨晓改,等.黄河口及其邻近水域夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J].水产学报,2016,40(5): 711-720.

[28]

CHEN K,LI K Q,GAO P Y,et a. Was dissolved nitrogen re-gime driving diatom to dinoflagellate shift in the Bohai Sea? Evidences from microcosm experiment and modeling repro-duction[J].Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(6): e2021JG006737.

[29]

ZHANG X S, YU K L, LI M, et al. Diatom-dinoflagellate suc-cession in the Bohai Sea: the role of N/P ratios and dissolved organic nitrogen components[J].Water Research, 2024, 251: 121150.

[30]

孙静.黑河干流纤毛虫群落特征及水质的生物学评价[D].兰州:西北师范大学,2014.

[31]

冷宇,赵升,刘霜,等.黄河口海域夏季浮游植物的分布特征 [J].水生态学杂志,2013,34(6):41-46.